



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Telecomunicació  
i Aeroespacial de Castelldefels



# TREBALL DE FI DE GRAU

**TÍTOL DEL TFG:** Disseny d'un predictor de demanda de satèl·lits LEO mitjançant deep learning

**TITULACIÓ:** Grau en Enginyeria de Sistemes Aeroespacials

**AUTOR:** Roger Rotés Biosca

**DIRECTOR:** Juan José Olmos Bonafé

**SUPERVISOR:** Miguel Ángel Vázquez

**DATA:** 5 de febrer de 2020



**Títol:** Disseny d'un predictor de demanda de satèl·lits LEO mitjançant deep learning

**Autor:** Roger Rotés Biosca

**Director:** Juan José Olmos Bonafé

**Supervisor:** Miguel Ángel Vázquez

**Data:** 5 de febrer de 2020

## **Resum**

Aquest document recull els objectius i el procés de creació d'una eina informàtica que utilitza tècniques d'intel·ligència artificial per preveure la demanda de connexió que podrien tenir les xarxes d'accés a internet basades en satèl·lits d'òrbita terrestre baixa. L'eina utilitza xarxes neuronals LSTM, dades obtingudes de la observació i hauria de servir com a base per a futurs estudis en aquest camp.





**Title :** Design of a deep learning tool for LEO satellites demand prediction

**Author:** Roger Rotés Biosca

**Advisor:** Juan José Olmos Bonafé

**Supervisor:** Miguel Ángel Vázquez

**Date:** February 5, 2020

## Overview

This document contains the objectives and the creation process of a software that, using artificial intelligence (AI), predicts the connection demand which low earth orbit satellites that provide internet access across the world could have in the future. This tool uses the LSTM neuronal nets and observed data and should be the basis of a future implementation to future studies.



A tots els qui creuen en l'esforç,  
a tots els qui creuen en mi.



# ÍNDEX

<b>Agraïments</b>	<b>1</b>
<b>Introducció</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTOL 1. Estudi de la situació actual</b>	<b>7</b>
1.1. Situació actual l'espai	7
1.2. Situació actual a la societat	8
1.3. Descripció del Problema	10
1.4. Proposta de Solució	10
1.4.1. Previsió de la demanda a partir de dades d'avions	11
1.4.2. Deep Learning	12
<b>CAPÍTOL 2. Disseny i Funcionament del programa</b>	<b>15</b>
2.1. Material necessari per a la programació	15
2.2. Obtenció de les òrbites	16
2.2.1. Fitxers TLE	16
2.2.2. Conversió d'Elements Keplerians a coordenades ECEF	17
2.2.3. Conversió de coordenades ECEF a coordenades LLA	19
2.2.4. Visualitzador d'Òrbites	20
2.2.5. Validació de les òrbites	21
2.3. Tractament de les dades dels avions	22
2.4. Càlcul del nombre d'usuaris connectats per satèl·lit	24
2.4.1. Distribució dels guanys	24
2.4.2. Recompte d'usuaris per beam	27
2.5. Deep Learning	27
2.6. Altres funcions	28
2.6.1. Test	28
2.6.2. In_Out	28
2.6.3. LLA2ECEF	28
2.6.4. KML	29

<b>CAPÍTOL 3. Resultats</b>	<b>31</b>
3.1. Obtenció dels resultats	31
3.1.1. Equipament addicional per a la obtenció de resultats	32
3.2. Validació dels resultats	33
3.3. Utilitat dels resultats	33
<b>Conclusions</b>	<b>35</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>37</b>
<b>APÈNDIX A. Fitxers TLE utilitzats</b>	<b>41</b>
A.1. ISS	41
A.2. OneWeb	41

# ÍNDEX DE FIGURES

1	Distribució de l'accés a internet arreu del món, Font: [1]	3
1.1	Tipus d'òrbites espacials terrestres i el seu camp de visió/cobertura, Font: [4]	7
1.2	Captura de pantalla de la web de Starlink, amb simulació de la constel·lació, Font: [5]	8
1.3	Evolució i previsió de la quantitat de mini-satèl·lits al llarg del temps. Font [3]	9
1.4	Interferència creada entre satèl·lits GEO i LEO, Font: [6]	10
1.5	Esquema de funcionament del Deep Learning, Font: [12]	12
2.1	Diagrama de blocs del procés que segueix el programa	15
2.2	Captura de pantalla de l'entorn de programació	16
2.3	Format de fitxer TLE	16
2.4	Explicació d'un fitxer TLE, Font: [16]	17
2.5	Resultat de la simulació en 2D de diversos satèl·lits OneWeb	21
2.6	Resultat de la simulació en 3D de totes les òrbites disponibles	22
2.7	Resultat de la simulació en 3D dels satèl·lits OneWeb durant 4hores	22
2.8	Trajectòria de la ISS, calculada pel simulator	23
2.9	Trajectòria real de la ISS segons la ESA	24
2.10	Patró de radiació per a 16 beams projectat a la superfície terrestre, Font: [6]	25
2.11	Diferents tipus de patrons de radiació estudiats	26
2.12	Taula generada per la funció que estableix la potència rebuda per cada avió	26
2.13	Taula generada per la funció que compta els avions connectats a cada satèl·lit	27
2.14	Captura de pantalla d'entrenament del procés de les xarxes neuronals	28
2.15	Sèrie temporal que mostra la demanda de connexió a un satèl·lit al llarg d'un dia	29
2.16	Fitxer KML d'un satèl·lit durant 10 minuts	30
3.1	Mostra del processat de la informació que conté la demanda d'usuaris	32
3.2	Sèrie de dades entrada i prevista pel deep learning	33





# ÍNDEX DE TAULES

1.1 Llistat d'empreses amb intenció de proporcionar internet amb satèl·lits LEO . .	9
2.1 Especificacions de l'ordinador utilitzat durant la programació . . . . .	15
2.2 Part de l'estructura que proporciona l'algorisme . . . . .	17
2.3 Constants utilitzades durant la conversió d'elements Keplerians a ECEF, Font: [17] . . . . .	18
2.4 Constants utilitzades durant la conversió de coordenades ECEF a LLA . . . . .	19
2.5 Paràmetres sobre els vols carregats a l'estructura per ser processats . . . . .	23
2.6 Paràmetres utilitzats durant el càlcul de la distribució dels guanys . . . . .	26
3.1 Satèl·lits a estudi per a la obtenció de resultats . . . . .	31
3.2 Especificacions del servidor de càlcul . . . . .	33



# AGRAÏMENTS

Voldria agrair tot el suport que he rebut durant aquests més de 7 mesos de treball als pares, germans, amics, i companys del CTTC.

Voldria fer un agraïment també al director d'aquest treball, Joan Olmos, per la confiança que ha posat en mi.

Per tota la confiança, paciència, recursos i tots els seus consells (no només referents al treball), m'agradaria fer una especial menció al qui m'ha guiat durant tot aquest temps, el meu tutor per part del Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, Miguel Ángel Vázquez.

Per últim, agrair a totes les persones involucrades en el meu procés de formació durant aquests 4 anys: companys i companyes, professors i professores i les persones que, potser sense saber-ho, han ajudat a fer possible que arribi aquest moment.

A tots vosaltres i als lectors d'aquest document,

Gràcies.

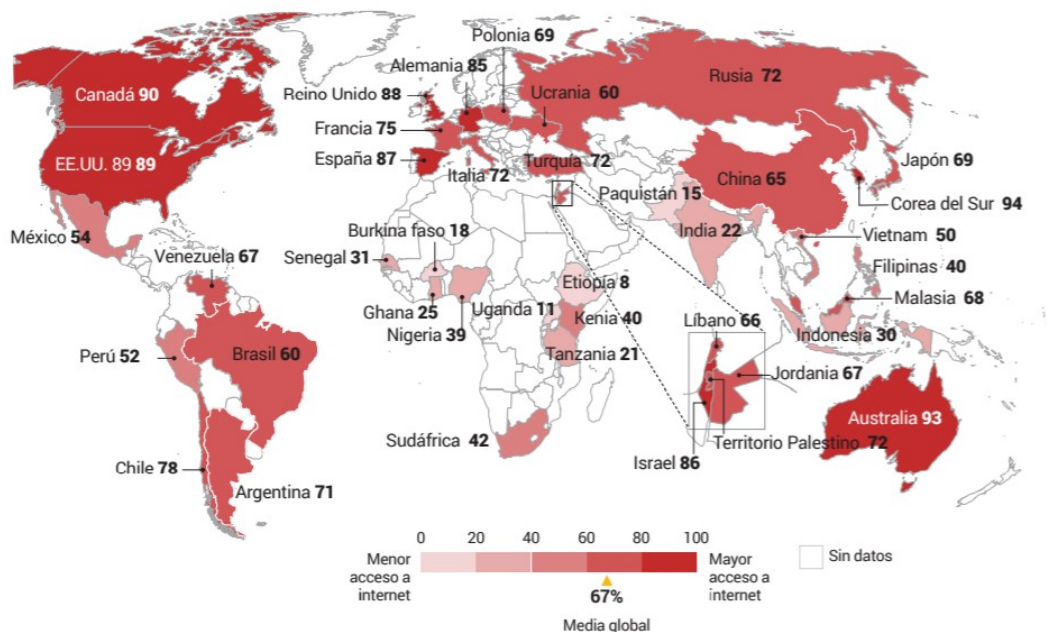


# INTRODUCCIÓ

L'alarmant auge dels satèl·lits LEO (d'òrbita terrestre baixa en anglès) en els darrers anys i la seva més que probable expansió en els propers anys, està destinat a ser un dels temes sobre la taula de les autoritats espacials d'arreu del món.

Els grans atractius d'aquests satèl·lits (proporcionar el que fins ara, ningú ha arribat a complir: una connexió a internet globalitzada i sense cables o fins i tot les funcionalitats que a hores d'ara encara estan per inventar), poden veure's eclipsats pels seus majors inconvenients, la degradació de serveis que fins ara han funcionat gairebé a la perfecció com pot ser la televisió per satèl·lit, les comunicacions entre satèl·lits actualment en òrbita o fins i tot l'acció quotidiana de rebre una previsió meteorològica fiable degut a la gran quantitat d'interferències introduïdes pels nous satèl·lits.

La figura 1 mostra dades de la ONU sobre l'accés a internet [1]. La diferència parla per si sola: només la meitat de la població terrestre té la possibilitat d'accedir a la xarxa d'internet. El fet de viure en un país en vies de desenvolupament o en països on no hi ha prou usuaris com per construir-hi una xarxa, barra l'accés a internet a milions de persones i xoca de ple amb el fet que en els països europeus cada llar té, de mitjana, 7 dispositius amb accés a internet. En aquests últims països es preveu un 20% d'augment en la quantitat de dispositius connectats a internet degut a l'IoT (internet de les coses).



Fuente: Poushter (2016, fig. 2, pág. 4). © Pew Research Center. Aviso legal: Pew Research Center ha publicado el contenido original en inglés, pero no ha revisado ni aprobado esta traducción.

Figura 1: Distribució de l'accés a internet arreu del món, Font: [1]

Dotar d'accés a internet a les zones a les quals fins ara és impensable i reforçar-lo a la resta del món (fins ara la connexió és forçosament mitjançant un cable). Nombroses empreses creuen que la tecnologia actual és capaç d'arribar a complir aquesta assignatura pendent de la mà d'aquest tipus de satèl·lits, anomenats també nano i pico satèl·lits

per la seva reduïda massa i mida en comparació dels satèl·lits convencionals. Per això, han anunciat la posada en marxa d'aquesta connexió imminentment, omplint així l'espai proper a la terra dels seus petits dispositius [2] [3].

Aquest estudi posa en el punt de mira els satèl·lits d'òrbita baixa per tal d'analitzar a fons els inconvenients que poden causar a curt i a llarg termini degut a les interferències que introdueixen a les constel·lacions actuals.

Per fer-ho es proposa, partint de la situació actual i descrivint els factors que impulsen a la posada en òrbita d'aquests nombrosos satèl·lits, la creació d'una eina que sigui capaç de dotar a empreses o autoritats a controlar aquestes interferències en les comunicacions per satèl·lit actuals a partir d'usos i adaptacions d'aquesta eina.

Aquesta eina es divideix en diversos mòduls, que són capaços de: determinar i simular qualsevol tipus d'òrbites, realitzar un seguiment de dades d'usuaris reals per a establir un model de demanda i, finalment, aplicar algoritmes d'intel·ligència artificial per preveure la demanda que tindran aquests nous satèl·lits en un futur.

L'objectiu doncs, és el disseny i la programació d'aquest programa, alhora que es pugui assegurar la seva utilitat en futurs estudis sobre interferències i també l'ús dels seus diferents mòduls esmentats amb anterioritat de forma individual.

Cal tenir en compte que aquest treball s'ha realitzat conjuntament amb el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) i que s'ha adaptat en tot moment a les necessitats i requeriments que el centre d'investigació ha considerat que poden ser més interessants des del punt de vista de la seva tasca. Així doncs, no és tant oferir mètodes per evitar aquestes futures i esmentades interferències, sinó proporcionar una eina que ajudi a futurs estudis a resoldre aquest problema, fent una previsió de la demanda a punts concrets de la Terra segons l'època de l'any. En aquest sentit cal dir també que l'objectiu del treball acadèmic és ser compatible i cenyir-se a les aspiracions i les investigacions dels professionals del CTTC, empresa que adquirirà l'eina per a la seva posterior explotació.

El treball s'ha estructurat en tres capítols:

1. Estudi de la situació actual: breu repàs dels conceptes més bàsics necessaris per a la comprensió de l'estudi, quina necessitat cobreix aquest programa i de quina manera es pensa enfrontar-s'hi. També s'especifica el material utilitzat durant la programació degut al requeriment posterior de material addicional.
2. Disseny i Funcionament del Programa: és el capítol principal i es divideix en diferents seccions segons els blocs del programa. Es defineixen els criteris, els objectius, la forma com es tracten les dades i tots els coneixements necessaris per a construir el programa, així com una prova del resultat de cada un dels blocs.
3. Resultats: Indica el procés d'obtenció dels resultats, des de quines han estat les dades introduïdes al programa fins a la validació dels mateixos.

Aquesta divisió pretén guiar al lector al llarg de tot el treball ja que segueix en tot moment l'ordre cronològic natural que s'ha seguit durant la realització del mateix.

Per últim s'han inclòs les conclusions del treball. Aquestes es poden resumir breument en: és possible fer una previsió de la demanda de connexió que tindran els futurs sistemes, però es necessiten dades al llarg del temps i una gran quantitat de capacitat de

càlcul. El procés simplificat d'obtenció d'òrbites es pot obtenir dades observades, però les empreses i autoritats no comparteixen informació sobre els seus sistemes. L'eina no soluciona el problema per sí sola, només és una ajuda a l'hora de prendre decisions i simular situacions.

La recerca i l'enginy han hagut d'anar agafats de la mà per a dur a terme un treball en què, si bé es podria dividir en diversos sectors (programació informàtica, sector aeroespacial, sector de les telecomunicacions, tractament de dades i intel·ligència artificial) desperta l'interès des del primer moment per a l'autor, estudiant en la fase final d'enginyeria en sistemes aeroespacials.





# CAPÍTOL 1. ESTUDI DE LA SITUACIÓ ACTUAL

Aquest capítol pretén posar en context al lector sobre quins factors han impulsat a les empreses a dissenyar les constel·lacions de satèl·lits d'òrbita terrestre baixa per a proporcionar connexió global a internet. També planteja els més que previsibles problemes que pot portar aquest fet i quina solució o ajuda proposa aquest estudi.

## 1.1. Situació actual l'espai

Una gran cursa tecnològica va culminar l'any 1957 quan es va posar en òrbita amb èxit el primer satèl·lit artificial de la Terra. Era l'Sputnik I de l'URSS i va estar en òrbita uns 3 mesos. Aquest fet s'ha repetit innumerable vegades des d'aleshores, ja sigui per a l'observació terrestre, missions espacials o per a un sector tecnològic completament diferent; les telecomunicacions.

Històricament hi ha hagut 3 tipus d'òrbites establertes: les LEO, MEO i GEO (per les seves inicials en anglès: òrbites terrestres de baixa altitud, mitja altitud i òrbita geoestacionària, respectivament), cada una reservada a un tipus de satèl·lit amb uns objectius i missions molt diferents. Així doncs, les òrbites geoestacionàries es reserven majoritàriament al sector de les telecomunicacions gràcies a la seva particularitat: els satèl·lits geoestacionaris es mantenen fixos en un punt a l'horitzó terrestre; al tenir una altitud d'òrbita d'uns 36.000 km per sobre la superfície terrestre, el seu període de rotació al voltant de la Terra és exactament d'un dia, evitant així, el fet d'haver de reorientar les antenes terrestres cada un cert temps. Es pot consultar un exemple de les òrbites i el camp de visió dels satèl·lits a les corresponents òrbites a la figura 1.1, on es pot veure de forma clara la raó per la qual un satèl·lit en una òrbita a major altitud té major visibilitat i cobertura de la superfície terrestre que un altre en una òrbita més baixa [4].

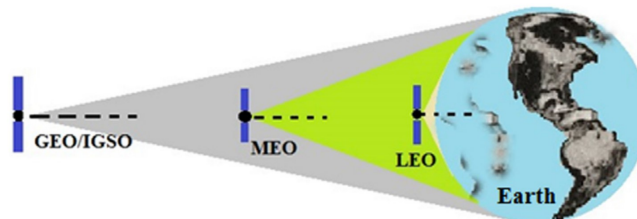


Figura 1.1: Tipus d'òrbites espacials terrestres i el seu camp de visió/cobertura, Font: [4]

La gran altitud a la que orbiten, però, porta algun desavantatge, com el retard en les comunicacions. Tradicionalment aquest retard no ha tingut massa importància. L'usuari final no nota aquest retard en gran mesura mentre, per exemple, mira un partit de futbol en un canal de televisió per satèl·lit [2].

El problema es podria solucionar doncs, amb satèl·lits d'òrbita LEO, que estan cridats a ser els protagonistes en els propers anys. Al comptar amb òrbites de fins a 2.000 km d'altitud sobre la superfície terrestre, aquest retard es redueix dràsticament per un factor de 18 vegades (respecte un satèl·lit geoestacionari) [9]. El problema d'aquest tipus d'òrbita és un altre: el poc temps que un satèl·lit està en contacte amb un punt determinat de la Terra.

El que proposen els interessats en satèl·lits d'òrbita LEO són constel·lacions formades per un gran nombre (de l'ordre de milers) de satèl·lits a cada pla orbital que cobreixin tots els punts de la Terra les 24 hores del dia. La figura 1.2 mostra una captura de pantalla de la pàgina oficial de Starlink, l'empresa amb més avenços en aquest aspecte, amb una simulació de la seva constel·lació final [5].



Figura 1.2: Captura de pantalla de la web de Starlink, amb simulació de la constel·lació, Font: [5]

L'avanç tecnològic ha permès als fabricants de satèl·lits encapsular amb una mida i massa reduïdes (i per tant, abaratir costos operacionals i de llançament) la tecnologia necessària per a les missions dels nous satèl·lits. La gran quantitat de satèl·lits LEO que es preveu posar en òrbita permet que el seu procés de fabricació es pot fer en cadena i no sota demanda com fins ara, fet que abarateix encara més el cost per satèl·lit que suposa a l'empresa. La suma d'aquests factors provoca un augment exponencial de la posada en òrbita d'aquest tipus de satèl·lits en els últims anys, tal i com mostra 1.3. La situació però, està lluny de canviar. I és que aquest tipus de satèl·lits (considerats micro-satèl·lits) es postulen per a convertir-se en els més majoritaris a l'espai i fins i tot arribar a saturar-lo [3].

## 1.2. Situació actual a la societat

Estar connectat a internet és la màxima aspiració per a qualsevol dispositiu electrònic de l'actualitat. Des d'electrodomèstics, cotxes, ordinadors,... tots els aparells moderns poden veure's beneficiats de la connexió a internet. És per això que recentment ja s'ha començat el desplegament de la 5a generació de comunicacions mòbils i del nou estàndard de WiFi, que prometen millores en les connexions a internet i els seus temps de resposta.

Ara bé, no només els aparells reclamen l'accés a internet, sinó les mateixes persones. En els últims anys, moltes aerolínies han començat a incorporar connexió a internet mitjançant WiFi als seus usuaris, pobles i ciutats sencers han guanyat accés a internet amb la mateixa tecnologia. I és que cada infraestructura, edifici o entitat lluita per oferir als seus usuaris una connexió a internet perquè es pugui seguir treballant fora l'oficina, veient les seves sèries preferides, escoltar la seva música o senzillament navegar per les pàgines d'internet amb la intenció de fidelitzar el client.

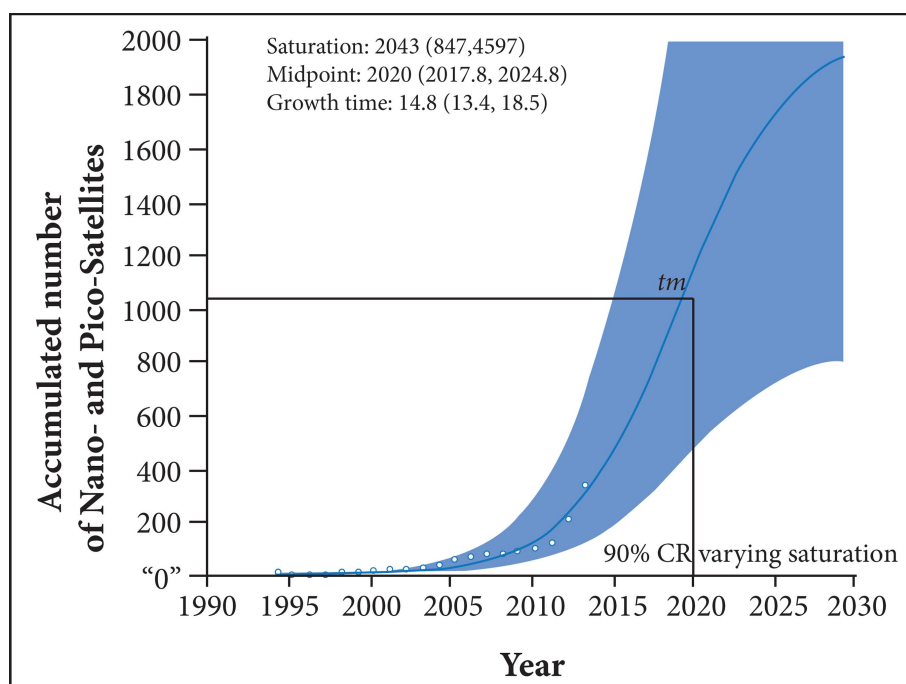


Figura 1.3: Evolució i previsió de la quantitat de mini-satèl·lits al llarg del temps. Font [3]

Mentre aquesta és la situació als països més desenvolupats, nombrosos estudis denuncien que gairebé la meitat de la població mundial encara no té accés a internet, ja sigui per falta de mitjans tecnològics o altres factors [1]. Moltes companyies, doncs, han anunciat recentment els seus ambiciosos plans en ser les primeres en una cursa per inundar el cel de satèl·lits LEO capaços, amb aquesta idea, d'eliminar aquesta barrera. Gràcies a l'ús d'una connexió semblant al WiFi de les cases i oficines que arribi des de l'espai, essent omnipresent a tot el planeta; a cada racó de la superfície terrestre, a cada punt de l'oceà i a cada punt del cel.

És evident doncs, la oportunitat que hi veuen aquí les companyies de telecomunicacions. La primera en donar servei a les àrees sense internet, serà guanyadora d'aquesta cursa i qui es quedarà amb aquest mercat. Per aquesta raó, algunes d'elles com Starlink ( propietat de SpaceX) o OneWeb ja han començat a executar els seus plans, com es pot veure a la taula 1.1 [5], [6], [7].

Taula 1.1: Llistat d'empreses amb intenció de proporcionar internet amb satèl·lits LEO

Companyia	Programats	Actualment en òrbita	Entrada en funcionament
StarLink	12.000 aprox.	177	2020
Oneweb	720	6	2019
Telesat	117	0	2022
LeoSat	120	0	2020

De totes les constel·lacions projectades de la taula 1.1, la que sembla evolucionar a més velocitat és la de StarLink. Tan sols durant els últims 6 mesos ha posat en òrbita més de 150 satèl·lits artificials per aquesta causa i el nombre continua augmentant amb cada viatge del seu coet Falcon 9, creix només per a aquesta finalitat i que té com a curiositat

que es pot re-aprofitar en la seva pràctica totalitat per a diversos llançaments espacials (altre cop, reduint el cost per satèl·lit) [3].

### 1.3. Descripció del Problema

Com tots els invents tecnològics, la idea d'una o múltiples constel·lacions de satèl·lits que proporcionin connexió a internet de forma global comporta una sèrie d'inconvenients. A llarg termini, l'acumulació de brossa espacial degut a la limitada vida útil dels propis satèl·lits. A curt termini, les més que probables interferències amb satèl·lits ja existents. Les noves constel·lacions de satèl·lits LEO queden per sota de les òrbites actuals i, degut al gran nombre d'elements que es planegen posar en òrbita, provocaran un "efecte pantalla", una mena d'eclipsi en les comunicacions per satèl·lit dutes a terme fins ara.

Però aquest "eclipsi" no només afectarà el camp de les comunicacions per satèl·lit, sinó que l'esmentat "efecte pantalla" també es produirà a nivell visual, tal i com es pot veure a la figura 1.4. Així doncs, aplicacions com la de la previsió meteorològica mitjançant satèl·lits, que porten dècades funcionant, millorant i que fins ara han anat perfeccionant-se, poden haver arribat a un punt d'inflexió, ja que amb la posada en òrbita d'aquestes constel·lacions veuran atenuada la seva eficàcia i els seus bons resultats [8], [6].

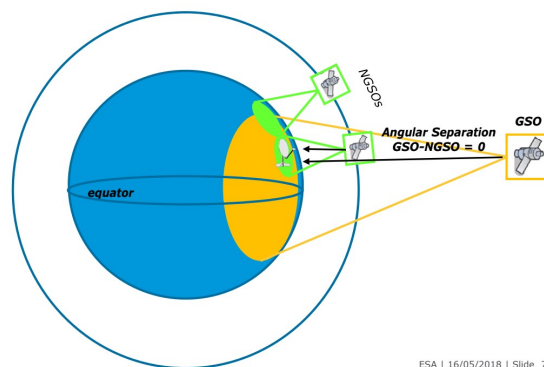


Figura 1.4: Interferència creada entre satèl·lits GEO i LEO, Font: [6]

Si actualment el nombre de satèl·lits artificials actius al voltant del planeta Terra és d'uns 2.000 [7], el fet que una sola companyia vulgui afegir més de 6 vegades aquest número ja desperta cert escepticisme. En aquest sentit, organitzacions com l'Agència Espacial Europea (ESA) ja han mostrat interès i la seva preocupació. És lògic pensar en futures regulacions i mesures dràstiques [6].

Així doncs, existeix un problema real a curt i a llarg termini amb diverses àrees afectades per al qual cal buscar una sol·lució per ajudar a contrarestar els efectes negatius del desplegament d'aquesta nova tecnologia.

### 1.4. Proposta de Solució

Un cop focalitzat el problema, es proposa el disseny d'un programa que mitjançant la intel·ligència artificial pugui preveure la demanda (en nombre d'usuaris) que s'espera per

a cada satèl·lit com a mesura. Amb la previsió de demanda, les autoritats poden planificar la distribució d'oferta per cobrir aquesta demanda sense posar en compromís els serveis que proporcionen els satèl·lits ja existents, monitoritzar les àrees amb més demanda, comprovar la viabilitat del sistema i fins i tot, dimensionar i limitar els futurs sistemes a desplegar.

La previsió de demanda també pot ser útil per a les mateixes empreses a l'hora de desplegar la xarxa de satèl·lits, dotant-les de la capacitat de prendre decisions sobre l'ample de banda i velocitat real de la connexió, la selecció de freqüències de transmissió, preveure la saturació dels canals i el temps de resposta o fins i tot, dimensionar la potència transmesa i el dimensionament de les antenes i les bateries que han de ser capaces d'alimentar-les.

Aquest solució consisteix en un programa informàtic format per diversos mòduls que realitzen funcions molt concretes: determinar i simular les òrbites dels satèl·lits seleccionats, realitzar un seguiment de les trajectòries d'usuaris, determinar la forma i distribució dels guanyos de cada transmissor i, per últim, el mòdul de la previsió mitjançant intel·ligència artificial.

#### **1.4.1. Previsió de la demanda a partir de dades d'avions**

Durant la confecció de l'estudi s'ha discutit sobre el tipus i l'origen de les dades d'usuaris: en aquest sentit s'ha descartat utilitzar informació aleatòria a favor d'utilitzar un origen de dades real.

Per una banda, les dades es podien obtenir des del portal VesselFinder [10], on es posen a disposició fitxers amb informació que recullen nombroses antenes privades dels seus col·laboradors sobre el que emeten vaixells mitjançant el seu radar secundari mentre estan dins el rang de captació de les antenes.

Per l'altra banda, el portal ADSBExchange [11] proporciona el mateix tipus d'informació però respecte aeronaus. Les aeronaus que disposen d'un radar secundari com a sistema de vigilància, emeten periòdicament senyals amb diversos paràmetres, incloent un identificador i la seva posició actual. En aquest cas són els propis usuaris de la pàgina web que volen obtenir informació sobre aeronaus els que es fan càrrec de la instal·lació d'antenes receptores de les transmissions del radar secundari dels avions. El nombre de registres de vols dependrà doncs, del nombre d'usuaris col·laboradors amb aquest proveïdor.

Davant la inviabilitat d'obtenir les dades de vaixells degut al preu que es demanava a canvi, s'ha optat per descarregar de manera gratuïta la informació des del segon origen, contenint dades d'una gran quantitat de vols arreu del món.

##### *1.4.1.1. Funcionalitat de les dades d'avions*

Aquestes dades poden ser tractades per extreure'n informació sobre posicions, que simularan usuaris en moviment a l'hora de fer la previsió de demanda. També es poden filtrar zones de la terra que siguin d'interès o limitar el nombre d'usuaris a simular.

Les dades que es poden descarregar lliurement i sense cap cost, pertanyen al primer dia de cada mes. Per a cada dia, hi ha disponibles 1.440 fitxers cada un dels quals conté les dades per a cada minut del dia, començant a les 00:00h.

### 1.4.2. Deep Learning

El deep learning és una tècnica d'intel·ligència artificial que ha estat guanyant molt protagonisme durant els últims anys. A grans trets, la utilitat del deep learning és la de fer previsions a partir d'un aprenentatge anterior.

Tal i com mostra l'esquema de la figura 1.5, el deep learning proporciona una sortida a partir d'una o múltiples entrades. El procés intern és força complex, on entren en joc diversos tipus d'algoritmes d'optimització. Bàsicament, l'algoritme ajusta els guanys de les matrius d'optimització per a adaptar-les a la funció a realitzar mitjançant informació d'exemple per a la qual es coneix la sortida que hauria de proporcionar amb la informació d'entrada esmentada. Aquest procés d'ajustament dels guanys s'anomena aprenentatge [12].

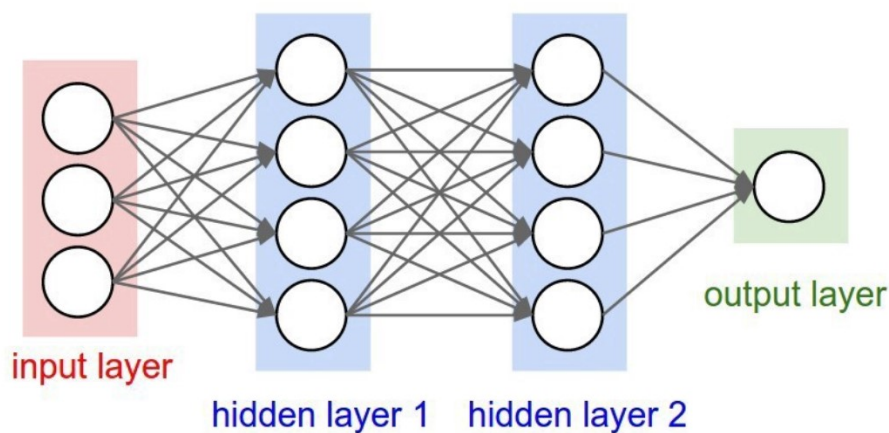


Figura 1.5: Esquema de funcionament del Deep Learning, Font: [12]

Un exemple molt clar i comú per casos en els quals és una bona solució utilitzar el deep learning és en reconeixement d'imatges. En aquest cas, les capes internes de l'algoritme s'ajusten per a catalogar objectes d'una fotografia, reconèixer i agrupar cares de persones o fins i tot classificar plàstics en una planta de reciclatge.

El deep learning és també especialment útil en una funció completament diferent a la de reconeixement d'imatges, com és la previsió de sèries temporals. Una sèrie temporal és qualsevol patró de dades ordenades cronològicament. En aquest cas, l'algoritme és capaç de diferenciar diferents factors com poden ser l'estacionalitat, les desviacions i la tendència real del patró de dades per a ajustar els guanys de les matrius o capes internes per a preveure els següents valors de la sèrie temporal que s'ha proporcionat com a entrada [13], [14].

Com que el que es vol aconseguir és preveure la demanda a partir de dades reals i ordenades cronològicament cal buscar el millor mètode per fer previsions.

Existeixen nombrosos tipus de xarxes neuronals que són les capes internes del deep learning. El seu funcionament i definició queden fora de l'objectiu d'aquest treball, que es centra al tipus de xarxes utilitzades, les xarxes LSTM.

Les xarxes LSTM (Long Short-Term Memory, en anglès) van ser inventades l'any 1997 i des d'aleshores s'utilitzen principalment en tasques de reconeixement de veu, escriptura a

mà i reconeixement d'imatges en general. El funcionament intern d'aquest tipus de xarxes queda fora de l'objecte d'aquest estudi, que es centra només en la seva aplicació.

Durant l'entrenament d'una xarxa LSTM, el resultat d'una iteració és utilitzat com a entrada per a la següent iteració. Com que el programa disposa del resultat final durant el procés d'aprenentatge, la xarxa LSTM anirà ajustant i actualitzant els paràmetres per arribar a una solució final que coincideixi amb la realitat. Aquest procés és conegut com a preveure i actualitzar (predict and update en anglès) [13], [15].

Un cop finalitzat el procés, la xarxa hauria de ser capaç de preveure (a partir d'entrades d'un interval de temps diferent a les que s'han utilitzat durant l'aprenentatge) una sortida coherent amb la realitat.





## CAPÍTOL 2. DISSENY I FUNCIONAMENT DEL PROGRAMA

En aquest capítol es descriu el procés de programació de l'eina proposada, a més a més d'explicar el seu funcionament. Addicionalment, s'indica el material necessari per a aquesta finalitat.

Per a la comprensió del funcionament del programa, el diagrama de blocs de la figura 2.1 mostra el procés que segueix per a completar el procés.

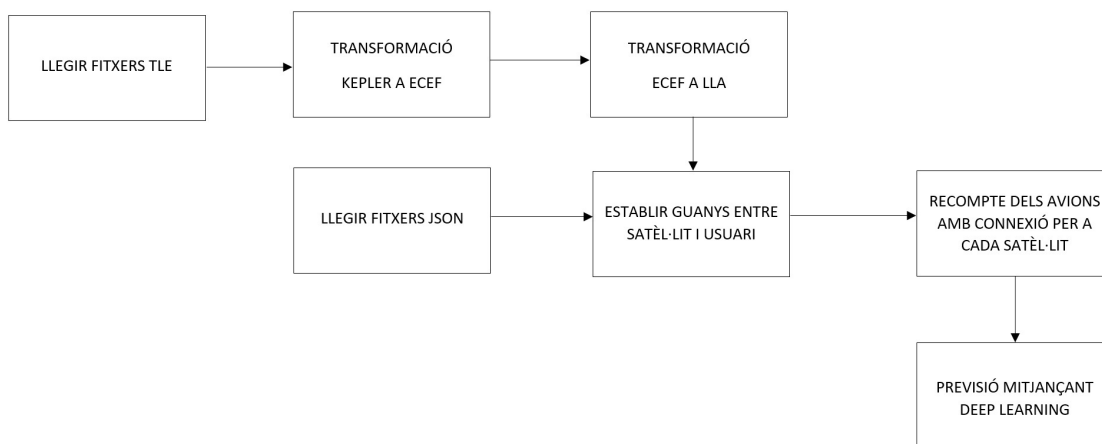


Figura 2.1: Diagrama de blocs del procés que segueix el programa

### 2.1. Material necessari per a la programació

Per a la programació d'aquesta eina s'ha utilitzat el programari Matlab i, per tant, el llenguatge de programació és el propi Matlab. L'entorn de programació Matlab (es pot veure a la figura 2.2) inclou un visor de variables, arxius, el propi programador i una consola de proves.

L'encarregat d'executar el programa Matlab és un ordinador d'especificacions bàsiques (es poden consultar a taula 2.1), la primera generació de l'ordinador portàtil Microsoft Surface Laptop.

Taula 2.1: Especificacions de l'ordinador utilitzat durant la programació

Velocitat del processador	2.5 GHz
Quantitat de memòria RAM	4 GB
Quantitat d'emmagatzematge	120 GB
Sistema Operatiu	Windows 10
Versió de Matlab	R2019a



l'objecte. En canvi, la segona línia reflecteix els paràmetres que són necessaris per definir la seva òrbita.

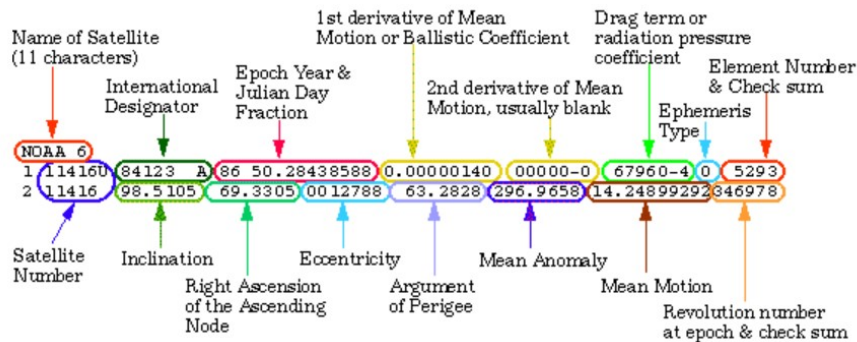


Figura 2.4: Explicació d'un fitxer TLE, Font: [16]

Cal doncs, obtenir les dades dels satèl·lits a estudiar per a introduir-les al programa i així poder determinar les seves òrbites. L'obtenció de les dades es fa a partir de la pàgina web Celestrak [7], on hi ha la possibilitat de descarregar informació de tots els satèl·lits que la NASA considera com a no classificats en format TLE [16]. D'aquest procés se n'encarrega l'algorisme "ReadTLE.m".

El primer pas que segueix el programa és llegir el fitxer d'entrada i ordenar la informació en una estructura, agafant els camps clau per un posterior processat. L'algorisme dona com a resultat l'estructura "sat", alguns dels camps es veuen representats a la taula 2.2. La informació de cada satèl·lit s'emmagatzemarà en files diferents i l'estructura anirà obtenint nous camps a mida que es necessitin durant la simulació.

Taula 2.2: Part de l'estructura que proporciona l'algorisme

Camp	Descripció i Utilitat
name	Principal identificador del satèl·lit
sat-num	Ajuda a identificar el satèl·lit, la lletra final correspon a <i>unclassified</i>
epoch	En anys, moment en el qual s'ha obtingut la informació més recent
element-num	Número d'element que s'ha posat en òrbita, ajuda a la identificació
i	Inclinació del pla orbital
RAAN	Longitud del node ascendent
e	Excentricitat de l'òrbita
w	Argument del perigeu
Mo	Anomalia mitjana
n	Període mitjà
rev-num	Revolucions completades en el moment de l'observació

### 2.2.2. Conversió d'Elements Keplerians a coordenades ECEF

Un cop extrets els paràmetres necessaris per a l'obtenció d'òrbites, cal fer la conversió d'aquests Elements Keplerians a coordenades ECEF per seguir el procés fins a LLA.

A partir d'aquests elements o paràmetres, és possible convertir-los a coordenades ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed). Aquest sistema està format per tres coordenades (X, Y i Z), amb origen al centre de la Terra i amb l'eix X orientat al punt  $0^{\circ}N$  i  $0^{\circ}E$ , és a dir, on el meridià de Greenwich intersecta amb el paral·lel 0, l'equador terrestre [17], [18].

Per fer la conversió, el programa "KeplerToECEF.m" utilitza el conjunt de fórmules següent, fent ús de les constants de la taula 2.3.

Taula 2.3: Constants utilitzades durant la conversió d'elements Keplerians a ECEF, Font: [17]

Símbol	Valor	Constant
G	$6.67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$	Constant Gravitacional
M	$5.27 \times 10^{24} kg$	Massa de la Terra
$\omega_e$	$7.292115 \times 10^{-5} rad/s$	Velocitat de rotació de la Terra (WGS-84)
$\pi$	3.141593	Número Pi

La informació que proporcionen els fitxers TLE correspon a un instant de temps passat, per això cal calcular (2.1) el temps,  $t_k$ , que ha passat des de l'última obtenció de dades fins a l'actualitat, on  $t$  és el temps actual.

$$t_k = t - t_o \quad (2.1)$$

Pel mateix motiu, cal calcular (2.2) l'anomalia mitjana  $M_k$ , en l'instant actual.

$$M_k = M_o + n \cdot t_k \quad (2.2)$$

De forma iterativa, es calcula l'anomalia de L'excentricitat ( $E_k$ ) utilitzant l'equació 2.3 fins a obtenir un valor que la diferència amb el de l'anterior iteració sigui més petita que  $10^{-8}$ .

$$E_k = M_k + e \cdot \sin E_k \quad (2.3)$$

En aquest punt, ja es pot calcular l'anomalia verdadera,  $v_k$ , utilitzant les equacions 2.4 i 2.5.

$$\cos v_k = \frac{\cos E_k - e}{1 - e \cdot \cos E_k} \quad (2.4)$$

$$\sin v_k = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E_k}{1 - e \cdot \cos E_k} \quad (2.5)$$

Un cop calculat el radi orbital,  $A$ , utilitzant l'equació 2.6, s'aplica la corresponent correcció segons 2.7 per obtenir  $r_k$ .

$$A = \left( \frac{G \cdot M}{n^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

$$r_k = A \cdot (1 - e \cdot \cos E_k) \quad (2.7)$$

En aquest punt, ja és possible calcular la posició en el pla orbital ( $X'_k$  i  $Y'_k$ ) amb les equacions 2.8 i 2.9. Posteriorment es troba la posició exacte en el sistema ECEF ( $X_k$ ,  $Y_k$  i  $Z_k$ ) mitjançant les equacions 2.11, 2.12 i 2.13. Abans però, cal corregir la longitud del node ascendent, ( $\Omega_k$ ), seguint l'equació 2.10.

$$X'_k = r_k \cdot \cos u_k \quad (2.8)$$

$$Y'_k = r_k \cdot \sin u_k \quad (2.9)$$

$$\Omega_k = \Omega_o - \Omega_e \cdot t \quad (2.10)$$

$$X_k = X'_k \cos \Omega_k - Y'_k \sin \Omega_k \cos i_k \quad (2.11)$$

$$Y_k = X'_k \sin \Omega_k + Y'_k \cos \Omega_k \cos i_k \quad (2.12)$$

$$Z_k = Y'_k \sin i_k \quad (2.13)$$

El resultat de la conversió són les coordenades  $X_k$ ,  $Y_k$  i  $Z_k$ , en el sistema ECEF. Durant aquest procés, s'han simplificat alguns dels passos. Aquestes simplificacions no afecten a la forma i mida de les òrbites, sinó que, al no aplicar algunes correccions, les òrbites tenen un cert desfasament respecte a la realitat. Aquestes simplificacions no afecten al funcionament del programa, com s'explica a la secció 2.2.5..

### 2.2.3. Conversió de coordenades ECEF a coordenades LLA

Com s'ha afirmat anteriorment, el procés de conversió a coordenades ECEF només és un pas intermedi en el camí fins a coordenades en sistema LLA, més interessant des del punt de vista de l'aplicació necessària en aquest programa. En aquest sentit, el programa disposa d'una funció per a aquest objectiu: "ECEFtoLLA.m".

De la mateixa manera que el sistema ECEF, el sistema LLA també està format per 3 coordenades, però en aquest cas són latitud, longitud i altitud. Aquest sistema és molt més adient, per exemple, per representar posicions de qualsevol cos en un mapa terrestre [18].

El procés de conversió necessita les constants de la taula 2.4, segons WGS-84. Les entrades de la funció són les 3 coordenades cartesianes ECEF ( $X$ ,  $Y$  i  $Z$  donades per la funció descrita a la secció 2.2.2.), i dona com a resultat les coordenades longitud ( $\lambda$ ), latitud ( $\phi$ ) i altitud ( $h$ ).

Taula 2.4: Constants utilitzades durant la conversió de coordenades ECEF a LLA

Símbol	Valor	Constant
$a$	6378137m	Radi terrestre
$e^2$	0.00669437999014	Excentricitat terrestre

El procés de conversió segueix la seqüència d'equacions que hi ha a continuació:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.14)$$

$$E^2 = a^2 - b^2 \quad (2.15)$$

$$F = 54b^2z^2 \quad (2.16)$$

$$G = r^2 + (1 - e^2)z^2 - e^2E^2 \quad (2.17)$$

$$c = \frac{e^4Fr^2}{G^3} \quad (2.18)$$

$$s = \sqrt[3]{1 + c + \sqrt{c^2 + c}} \quad (2.19)$$

$$P = \frac{F}{3(s+1/s+1)^2 G^2} \quad (2.20)$$

$$Q = \sqrt{1 + 2e^4 P} \quad (2.21)$$

$$r_o = -\frac{Pe^2 r}{1+Q} + \sqrt{\frac{1}{2}a^2 \left(1 + \frac{1}{Q}\right) - \frac{P(1-e^2)z^2}{Q(1+Q)} - \frac{1}{2}Pr^2} \quad (2.22)$$

$$U = \sqrt{z^2 + (r - r_o e^2)^2} \quad (2.23)$$

$$V = \sqrt{z^2(1-e^2) + (r - r_o e^2)^2} \quad (2.24)$$

$$z_o = \frac{b^2 z}{aV} \quad (2.25)$$

$$h = U \left(1 - \frac{b^2}{aV}\right) \quad (2.26)$$

$$\phi = \arctan \frac{z + e'^2 z_o}{r} \quad (2.27)$$

$$\lambda = \arctan \frac{y}{x} \quad (2.28)$$

## 2.2.4. Visualitzador d'Òrbites

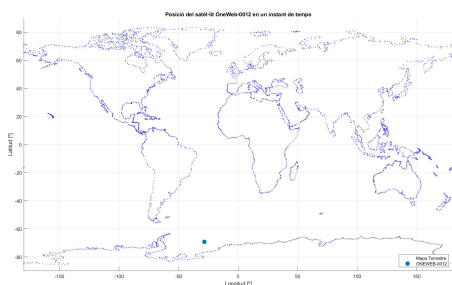
A mode de visualitzar els resultats de forma més entenedora, comprovar la funcionalitat del programa i demostrar el potencial del simulador, s'ha afegit un mòdul que transforma la informació obtinguda dels satèl·lits processats a imatges en dues dimensions (veure apartat 2.2.4.1.) i a fitxers KML utilitzats pel programa Google Earth (útil per a veure trajectòries en tres dimensions, veure l'apartat 2.2.4.2.). Totes les simulacions han utilitzat el fitxer TLE de l'anex A.2..

### 2.2.4.1. 2D

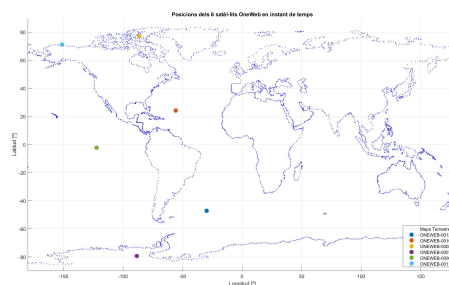
Per a la visualització de les trajectòries en 2D, s'ha optat per fer-ho mitjançant gràfics. En aquest cas, és possible representar la posició en un temps concret d'un sol satèl·lit (figura 2.5(a)), les posicions en un temps concret de múltiples satèl·lits (figura 2.5(b)), la trajectòria al llarg d'un temps d'un sol satèl·lit (figura 2.5(c)) o les trajectòries durant un temps de múltiples satèl·lits (figura 2.5(d)).

### 2.2.4.2. 3D

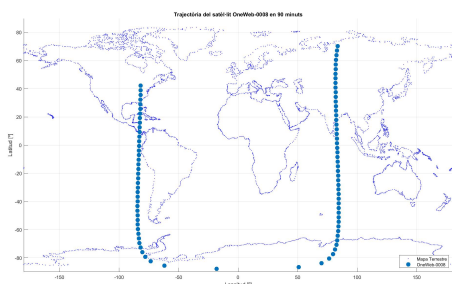
A la figura 2.6(a) es pot veure una imatge del resultat del càlcul de les òrbites de tots els satèl·lits amb informació disponible el dia 1-8-2019, durant 10 minuts. S'hi pot observar la immensa quantitat de satèl·lits que envolten el planeta terra, així com els diferents nivells d'òrbites (exposades a la secció 1.1.), i també com els objectes més propers a la superfície terrestre recorren una major distància en un mateix temps que aquells més allunyats.



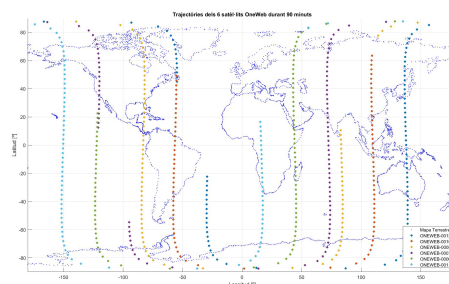
(a) Un sol satèl·lit OneWeb-0012 en un instant



(b) Diversos satèl·lits OneWeb en un instant



(c) Un sol satèl·lit OneWeb-0008 durant 90 minuts



(d) Diversos satèl·lits OneWeb durant 90 minuts

Figura 2.5: Resultat de la simulació en 2D de diversos satèl·lits OneWeb

La figura 2.6(b) mostra el mateix càlcul des del mateix punt de vista, però ampliat a 180 minuts de simulació. En aquest cas, l'entremat d'òrbites LEO obstrueix per complet la visualització de la Terra, però permet veure millor les òrbites GEO i de gran altitud.

Per últim, les figures 2.7(a) i 2.7(b) mostren (1 sol satèl·lit OneWeb i tots 6 satèl·lits OneWeb alhora, respectivament) els mateixos satèl·lits que a l'apartat anterior, 2.2.4.1., però amb un temps de simulació de 4 hores i en 3D, on es pot veure que cobreixen gran part de la Terra al llarg d'aquest període de temps.

### 2.2.5. Validació de les òrbites

Durant el procés de conversió de coordenades, s'han produït una sèrie de simplificacions: s'ha optat per no aplicar algunes de les correccions. Aquestes simplificacions no alteren el resultat final en gran mesura, les òrbites tenen les característiques generals que els pertoca, però es veuen afectades per un desfasament en el temps.

A la figura 2.8 es pot veure l'òrbita generada pel simulador d'òrbites en vers a l'òrbita generada (figura 2.9) per un dels rastrejadors de satèl·lits que estan disponibles a internet. En els dos casos el satèl·lit pel qual s'ha calculat l'òrbita és el mateix, l'Estació Espacial Internacional (veure taula A.1., i el simulador s'ha configurat per veure la trajectòria dels últims 90 minuts, ja que és la trajectòria que reflecteix el rastrejador en línia [7].

Comparant la trajectòria del simulador, figura 2.8, amb la trajectòria real segons la ESA, figura 2.9, es pot observar que no coincideixen. Tot i això, s'ha comprovat amb diversos satèl·lits com paràmetres tant importants en una òrbita com el període de rotació, la latitud mínima i màxima, la distància entre cicles, l'altitud i la velocitat lineal coincideixen. Per a



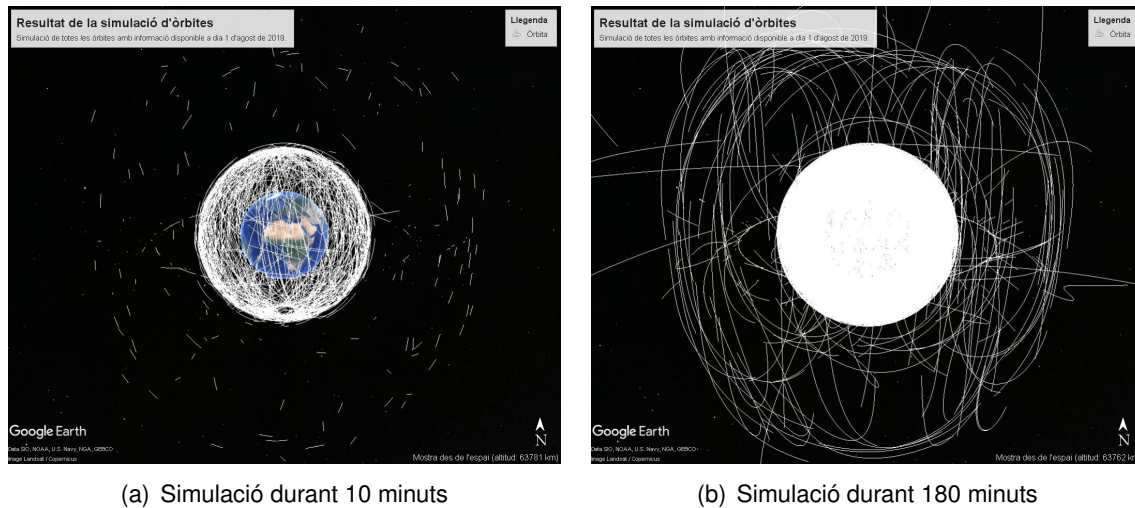


Figura 2.6: Resultat de la simulació en 3D de totes les òrbites disponibles

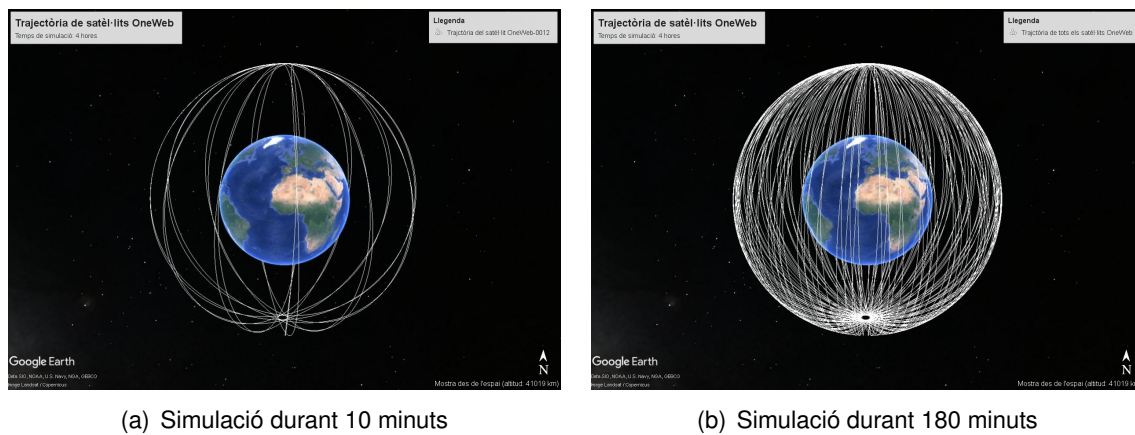


Figura 2.7: Resultat de la simulació en 3D dels satèl·lits OneWeb durant 4hores

la funció que ha estat dissenyat aquest simulador és suficient aquest nivell de precisió ja que la trajectòria dels satèl·lits és un procés cíclic; es repeteix en el temps.

El simulador d'òrbites donarà com a resultat unes òrbites que, si bé compleixen a la perfecció la forma i tamany de l'òrbita real que traça el satèl·lit, estarà desfassada un cert temps amb la realitat degut a la no aplicació de certes correccions durant les conversions esmentades en les seccions 2.2.2. i 2.2.3.. L'objecte d'interès en aquest estudi és més la situació general de les diferents constel·lacions (a grans trets) que no pas la situació detallada en un temps concret d'un satèl·lit determinat.

## 2.3. Tractament de les dades dels avions

Tal i com s'ha proposat a l'apartat 1.4.1.1., s'utilitzen dades de nombrosos vols d'avions per preveure la demanda que pot tenir cada satèl·lit un cop entrin en funcionament.

El proveïdor de la informació la proporciona en diversos fitxers, un per a cada minut del dia, el format dels quals és "json". El primer pas per a processar les dades és, doncs,



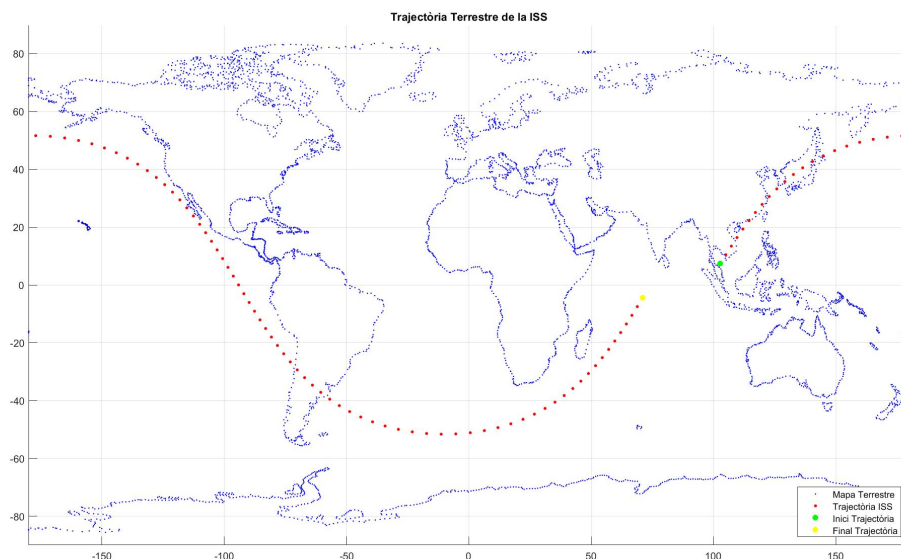


Figura 2.8: Trajectòria de la ISS, calculada pel siumulador

bolcar en una estructura interna tota la informació del fitxer. D'aquesta forma, el programa pot recórrer les diferents línies de la taula (cada línia és un vol) per agafar els camps que interessin (enumerats a la taula 2.5) i filtrar aquelles files de la taula que no interessin, principalment les que no tenen informació sobre la posició.

Taula 2.5: Paràmetres sobre els vols carregats a l'estructura per ser processats

Camp	Funció
ICAO	Identificar l'aeronau
Latitud	Posicionar l'aeronau
Longitud	Posicionar l'aeronau
Altitud	Posicionar l'aeronau
Marca de temps	Relacionar la posició amb el temps

En aquest punt, el programa ordena la informació: carrega a una nova estructura tots els paràmetres de la taula 2.5, amb només els camps clau per realitzar un seguiment dels diferents vols (primer minut del dia).

Per als següents minuts del dia, es busca a la taula creada en el pas anterior en busca de si l'aeronau ja ha estat entrat a la taula amb anterioritat, comparant el camp ICAO de l'aeronau del qual es vol fer el seguiment amb cada un dels camps ICAO de totes les files de la taula. En cas positiu, la posició s'adjunta a continuació de la que conté actualment la taula per crear un vector de posicions per a cada minut. Si no es troba l'aeronau, significa que no es disposava d'informació amb anterioritat, i per tant s'afegeix una nova fila al final de la taula amb la informació d'aquell minut.

Un cop ha acabat amb tots els avions d'un fitxer (un minut de dades), el programa torna a començar el procés carregant el següent fitxer, el minut posterior al que ja ha acabat. Aquest procés és molt senzill, però degut a la gran quantitat de dades que ha de manejar

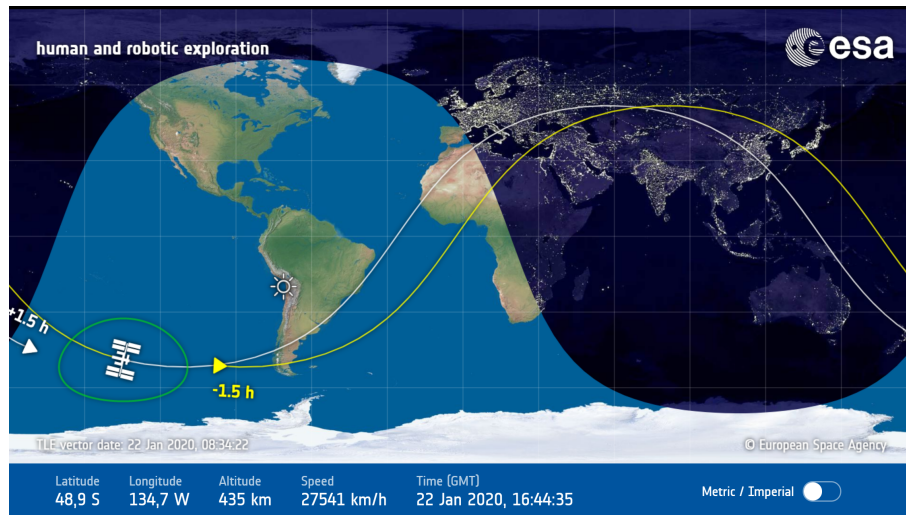


Figura 2.9: Trajectòria real de la ISS segons la ESA

el programa (els fitxers més actuals disponibles tenen de l'ordre de desenes de milers de vols al dia), pot arribar a trigar setmanes de càlcul.

El resultat que proporciona l'algorisme que interpreta les dades dels avions és una estructura amb els camps ja esmentats. La posició, en sistema LLA (veure secció 2.2.3.), està ordenada al llarg del temps, fet que permet complir l'objectiu d'aquest mòdul del programa: realitzar un seguiment de diversos avions al llarg d'un dia sencer.

## 2.4. Càlcul del nombre d'usuaris connectats per satèl·lit

En aquest mòdul, el que es proposa és calcular el nombre real d'usuaris (en aquest cas avions) connectats a cada satèl·lit. Per aquest motiu, la funció *beampattern.m* obté com a entrades la informació dels satèl·lits i dels vols i proporciona com a resultat una taula anomenada *gains*.

Cada satèl·lit a estudiar té una taula *gains* associada, que conté tantes files com vols resultats del tractament de dades dels avions (veure secció 2.3.) i tantes columnes com minuts a realitzar el seguiment. Aquesta taula, permet saber si l'usuari (avió) té línia directa amb el satèl·lit (té connexió) i amb quina magnitud es veu atenuat el senyal provinent del satèl·lit, amb la intenció que si un usuari determinat rep poc senyal d'un dels satèl·lits i molt d'un altre, pugui triar el que més senyal li proporciona (en funció també de la capacitat i la demanda).

En aquest càlcul, es considera que un avió pot mantenir contacte amb un satèl·lit si l'angle d'elevació amb el que l'avió veu el satèl·lit és major a  $10^\circ$ .

### 2.4.1. Distribució dels guanys

Les antenes utilitzades en telecomunicacions no tenen un patró de radiació homogeni, és a dir, no radien amb la mateixa potència o intensitat de senyal en totes les direccions.

És per això que cal caracteritzar el patró de radiació (beam pattern en anglès) en funció de l'angle o inclinació entre satèl·lit i usuari, tant per a l'angle horitzontal  $\theta$  com pel vertical  $\phi$ . Per simplicitat, en aquest estudi es considera que el patró de radiació de cada beam és simètric vertical i horitzontalment.

El programa incorpora el codi necessari per assumir una distribució dels guanys en que cada satèl·lit disposa de 16 antenes o *beams* en forma de  $4 \times 4$  *beams*, com planteja l'estudi de la ESA [6] (veure figura 2.10). Tot i formar part del codi, durant les simulacions s'ha desactivat aquesta opció i es considera que cada satèl·lit disposa d'una sola antena o *beam* amb l'objectiu de simplificar el posterior processat d'informació.

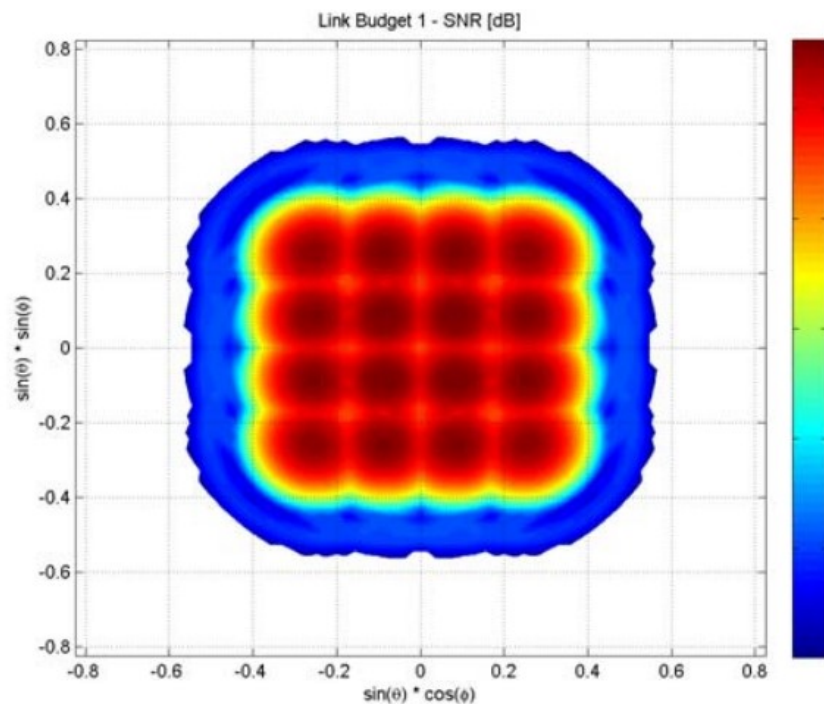


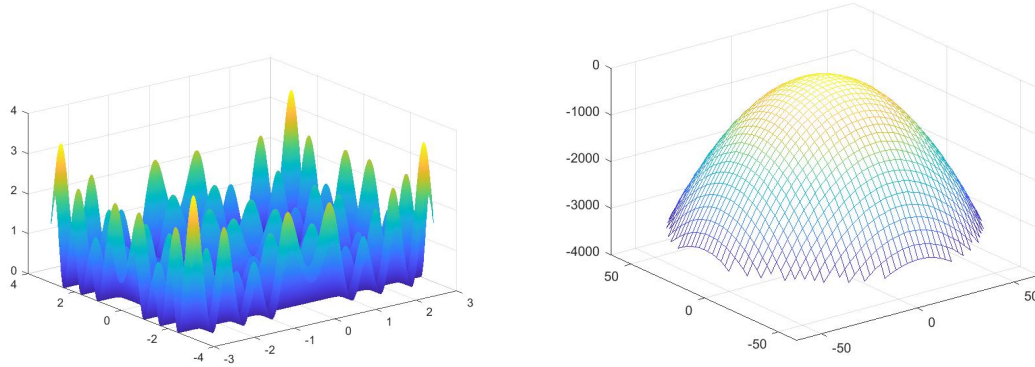
Figura 2.10: Patró de radiació per a 16 beams projectat a la superfície terrestre, Font: [6]

#### 2.4.1.1. Patró de radiació lineal

La forma més senzilla de caracteritzar un patró de radiació és assumint que el senyal es dissipa de manera lineal, sense variacions en els angles  $\theta$  i  $\phi$ . La figura 2.11(a) mostra un exemple d'aquest tipus de patró. En aquest estudi, però, s'ha descartat el seu ús degut a la poca semblança amb els patrons de radiació de les antenes reals.

#### 2.4.1.2. Patró de radiació Gaussià

El patró de radiació Gaussià, més fidel a la realitat i utilitzat en estudis semblants de la ESA [6], és el que assumeix una distribució del guany gaussiana. Partint de la funció de distribució de Gauss (equació 2.29, s'arriba a l'equació 2.30) on  $G$  és el guany i les coordenades  $x$  i  $y$  es substitueixen pels dos angles  $\theta$  i  $\phi$ . Es pot veure un exemple de distribució de guany gaussiana a la figura 2.11(b).



(a) Patrò de radiació lineal

(b) Patrò de radiació gaussià

Figura 2.11: Diferents tipus de patrons de radiació estudiats

$$f(x,y) = A \exp \frac{x^2 + y^2}{\sigma} \quad (2.29)$$

$$G(\theta, \phi) = A \exp \frac{\theta^2 + \phi^2}{2\sigma} \quad (2.30)$$

Els paràmetres que s'han utilitzat durant les simulacions es poden consultar a la taula 2.6:

Taula 2.6: Paràmetres utilitzats durant el càlcul de la distribució dels guanys

Paràmetre	Valor
$\theta_{3dB}$	$2^\circ$
$\sigma$	$-\frac{2\theta_{3dB}^2}{\log(0.5)}$

La figura 2.12 mostra la taula gains per a un satèl·lit. Les unitats són representatives i equivaldrien al nivell de potència rebuda per l'avió (com més alt, menys atenuació degut al desalineament entre satèl·lit i avió).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	6.9108e-10	6.9108e-10	6.9108e-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3.4014e-12	3.4014e-12	7.3535e-16	6.7659e-27	2.8795e-34	1.0268e-52	4.1930e-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1.4327e-08	6.9108e-10	2.1296e-12	3.8176e-16	3.9811e-21	8.5230e-35	1.7497e-43	2.0896e-53	1.4517e-64	5.8670e-77	1.3794e-90	1.8865e-105	1.8865e-105	1.8865e-105	1.3794e-90	5.8670e-77	1.4517e-64	1.7497e-43	3.9811e-21	1.4327e-08	2.8795e-34
7	1.3046e-08	9.1526e-10	7.3535e-16	6.9108e-10	6.9108e-10	7.1292e-43	8.6029e-64	1.5609e-104	6.4411e-176	1.6392e-267	0	0	0	0	0	0	0	1.7497e-43	2.0896e-53	1.4517e-64	5.8670e-77
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	6.9108e-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	6.9108e-10	6.9108e-10	6.9108e-10	0	0	2.1296e-12	2.1296e-12	2.1296e-12	3.8176e-16	3.8176e-16	3.9811e-21	8.5230e-35	1.4517e-64	2.6692e-198	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	7.1292e-43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1.3046e-08	1.4327e-08	1.4327e-08	1.4327e-08	9.1526e-10	9.1526e-10	3.4014e-12	9.2480e-21	6.7659e-27	7.1292e-43	1.0268e-52	4.1930e-16	1.9609e-104	1.0502e-137	6.4411e-176	4.5242e-219	3.6392e-267	0	0	0	0
14	9.1526e-10	1.4327e-08	1.3046e-08	6.9108e-10	2.1296e-12	3.9811e-21	2.4151e-27	1.7497e-43	2.0896e-53	1.4517e-64	5.8670e-77	1.8865e-105	1.5009e-121	1.8704e-157	1.4148e-220	0	0	0	0	0	0
15	6.9108e-10	6.9108e-10	6.9108e-10	6.9108e-10	2.1296e-12	2.1296e-12	2.1296e-12	3.8176e-16	3.9811e-21	2.4151e-27	8.5230e-35	1.7497e-43	2.0896e-53	5.8670e-77	1.3794e-90	1.5009e-121	1.8704e-157	2.6692e-198	4.3622e-244	8.1645e-295	4.9400e-300
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1.3046e-08	0	6.9108e-10	2.1296e-12	3.8176e-16	3.9811e-21	2.4151e-27	8.5230e-35	2.0896e-53	1.4517e-64	1.3794e-90	1.8865e-105	6.9468e-139	2.9295e-177	4.3622e-244	4.9400e-300	3.22	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1.4327e-08	1.3046e-08	6.9108e-10	6.9108e-10	6.9108e-10	2.1296e-12	2.1296e-12	2.1296e-12	3.8176e-16	3.8176e-16	3.9811e-21	3.9811e-21	2.4151e-27	8.5230e-35	1.7497e-43	2.0896e-53	1.4517e-64	5.8670e-77	0	0	0
23	1.4327e-08	1.4327e-08	1.4327e-08	1.4327e-08	9.1526e-10	9.1526e-10	3.4014e-12	3.4014e-12	7.3535e-16	9.2480e-21	6.7659e-27	2.8795e-34	1.7497e-43	1.0268e-52	8.6029e-64	2.2041e-270	3.6354e-285	3.4882e-301	5.7534e-316	0	0
24	3.9811e-21	9.1526e-10	9.2480e-21	7.1292e-43	1.8815e-120	1.6823e-242	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1.4327e-08	1.3046e-08	2.1296e-12	3.8176e-16	8.5230e-35	2.0896e-53	1.5009e-121	1.7497e-43	2.0896e-53	1.4517e-64	5.8670e-77	1.8865e-105	1.5009e-121	1.8704e-157	1.4148e-220	0	0	0	0	0	0
26	1.4327e-08	1.3046e-08	6.9108e-10	2.1296e-12	2.1296e-12	3.8176e-16	3.8176e-16	2.1296e-12	6.9108e-10	1.4327e-08	9.2480e-21	8.6029e-64	3.4100e-156	3.6392e-267	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	6.9108e-10	6.9108e-10	6.9108e-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	1.4327e-08	6.9108e-10	6.9108e-10	6.9108e-10	1.3046e-08	1.3046e-08	6.9108e-10	2.1296e-12	3.9811e-21	2.0896e-53	1.5009e-121	3.6322e-244	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	1.3046e-08	3.4014e-12	7.3535e-16	7.3535e-16	7.3535e-16	0	1.4327e-08	1.3046e-08	2.1296e-12	3.8176e-16	2.4151e-27	1.7497e-43	1.4517e-64	1.8865e-105	6.9468e-139	2.9295e-177	4.3622e-244	8.1645e-295	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	6.9108e-10	0	6.9108e-10	2.1296e-12	2.1296e-12	2.1296e-12	2.1296e-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	1.4327e-08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 2.12: Taula generada per la funció que estableix la potència rebuda per cada avió

### 2.4.2. Recompte d'usuaris per beam

Independentment de quin tipus de beam es seleccioni, el següent pas és fer el recompte d'usuaris (avions) a cada beam. En aquest sentit, la funció *beampattern.m* incorpora una secció que recorre la taula *gains* i fa el càlcul de quants avions hi ha en contacte (interpretant que voldran establir connexió) amb cada un dels diferents beams del satèl·lit. El recompte total d'usuaris (demanda) s'emmagatzema a una taula per a cada satèl·lit anomenada *aircrafts* tal i com mostra la figura 2.13.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	30047	30049	30063	30049	30030	29998	29987	29968	29905	29885	29866	29848	29813	29761	29718	29633	29425	29338
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		

Figura 2.13: Taula generada per la funció que compta els avions connectats a cada satèl·lit

## 2.5. Deep Learning

La funció d'aquest mòdul és, tal i com s'ha proposat a la secció 1.4.2., la d'utilitzar eines que aprofiten la intel·ligència artificial per arribar a fer una previsió del nombre d'aeronaus connectats a cada satèl·lit.

Aquest mòdul és capaç de crear la xarxa neuronal necessària i entrenar-la amb les dades històriques de la taula *aircrafts* de cada satèl·lit (calculada a l'apartat anterior 2.4.2.) per a preveure la taula *aircrafts* del futur, segons el que ha après durant l'entrenament.

Durant l'entrenament de les xarxes neuronals, l'usuari pot veure l'estat del procés en una pantalla com la que mostra la figura 2.14.

Un cop finalitzat aquest procés, els paràmetres finals que descriuen les xarxes neuronals entrenades queden guardats en una variable i aquestes ja són aptes per al següent pas, la previsió. El resultat es pot visualitzar en forma de gràfic temporal a la figura 2.15, on es veu al llarg del dia, la quantitat d'aeronaus que podria establir contacte amb cada satèl·lit a cada minut del dia. Aquesta sèrie temporal es pot veure que és periòdica, fet que coincideix amb el període d'orbitació del satèl·lit (cada un cert temps passa per una zona de la terra amb poca demanda).

Gràcies a que l'algorisme utilitzat per a la previsió s'entrena específicament per a les dades d'entrada, que a més a més és capaç d'autocorregir-se fins a arribar a un nivell de precisió determinat i la seva eficàcia amb el tipus d'entrades en format de sèrie de dades temporals, queda demostrada la seva validesa per aquesta aplicació.

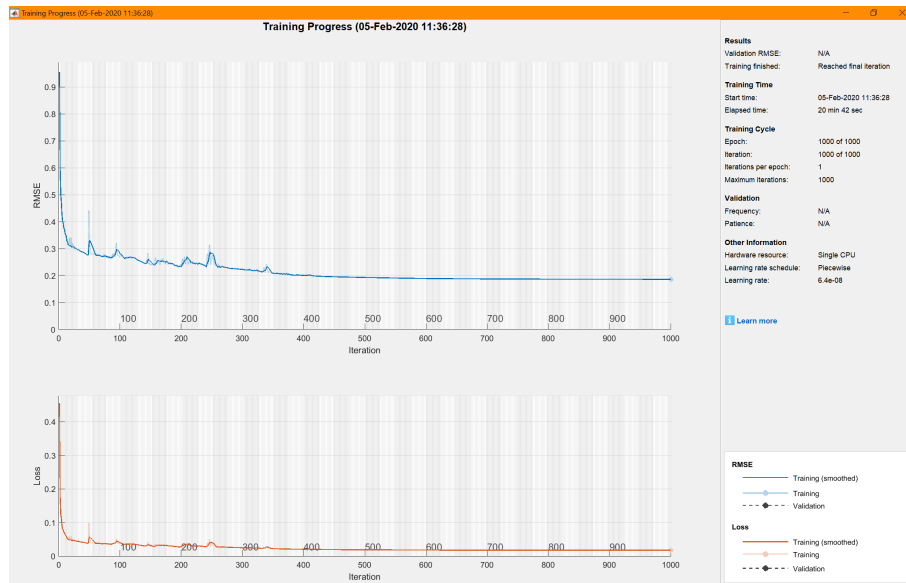


Figura 2.14: Captura de pantalla d'entrenament del procés de les xarxes neuronals

## 2.6. Altres funcions

Degut a la necessitat de passos intermedis en algun dels càlculs, s'ha requerit l'elaboració d'altres funcions que no han estat anomenades amb anterioritat pel fet que són internes a altres funcions ja esmentades. Es descriuen a continuació.

### 2.6.1. Test

Dins la funció *test.m* s'allotja el codi necessari per a l'execució completa de l'eina. La seva execució desencadena la seqüència de passos descrits en aquest capítol per tal d'arribar als resultats finals, crea les estructures necessàries i assigna a cada variable els resultats parcials per a futurs usos d'aquests.

### 2.6.2. In\_Out

La funció *in\_out.m* s'encarrega, en el cas que s'opti per al model de 16 transmissors per satèl·lit (per a més informació vegeu l'apartat 2.4.1.), de fer el recompte de quants usuaris estan a l'àrea de cobertura de cada un dels 16 beams per, posteriorment, entregar aquesta informació al mòdul de deep learning i poder dur a terme l'entrenament i futura previsió.

### 2.6.3. LLA2ECEF

La funció interna *LLA2ECEF.m* segueix el procés invers a la descrita a l'apartat 2.2.3.. Proporciona, a partir d'un vector de latituds, longituds i altituds ( $\Phi$ ,  $\lambda$  i  $h$  respectivament), un vector de sortida en el sistema ECEF. El procediment que segueix es descriu a continuació i fa us de les constants descrites a la taula 2.4.

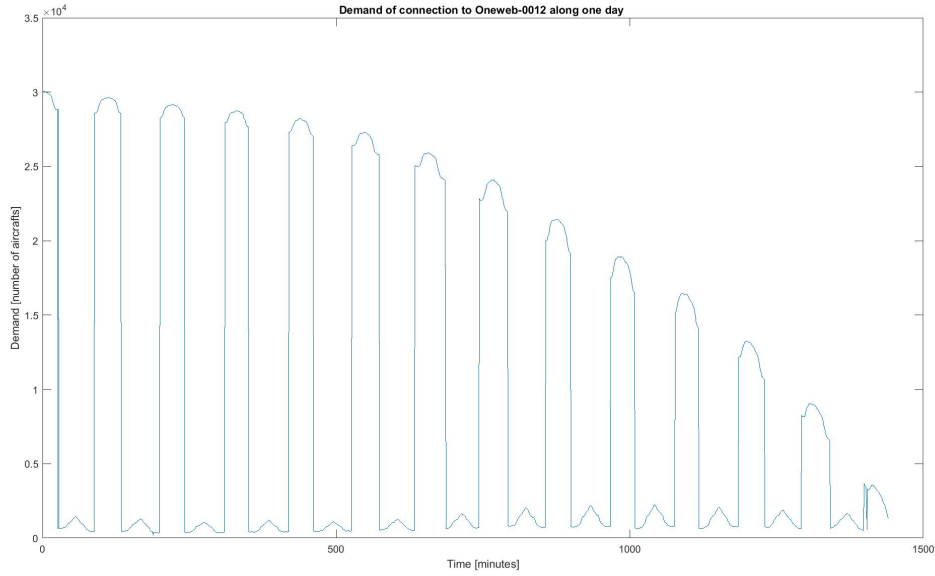


Figura 2.15: Sèrie temporal que mostra la demanda de connexió a un satèl·lit al llarg d'un dia

Les coordenades  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  del sistema ECEF es poden trobar mitjançant les equacions 2.31, 2.32 i 2.33.

$$X = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \Phi} + h} \cos \Phi \cos \lambda \quad (2.31)$$

$$Y = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \Phi} + h} \cos \Phi \sin \lambda \quad (2.32)$$

$$Z = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \Phi} + h} \sin \Phi \quad (2.33)$$

#### 2.6.4. KML

Aquesta funció conté el codi necessari per a passar un vector de posicions en LLA al format KML que utilitza Google Earth. A la figura 2.16 es pot veure un exemple de fitxer KML utilitzat en la simulació a la secció 2.2.4.2. proporcionat per aquesta funció.



```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2">
  <Document>
    <name>1</name>
    <Placemark>
      <Snippet maxLines="0"> </Snippet>
      <description> </description>
      <name>Line 1</name>
      <LineString>
        <altitudeMode>absolute</altitudeMode>
        <coordinates> 69.2527311805317,86.036389638289,6460691.65068313 55.9097656321698,89.4401975556955,6471348.09003569 -106.210361356571,
87.1164333381913,6465192.81982739 -108.048180093155,83.6991071629435,6455656.16857478 -108.771683207553,80.280951533558,6445931.65567636 -109.25064580099,
76.8630307039412,6436053.55536988 -109.636563280506,73.4454856310396,6426056.17667351 -109.977223579525,70.0283225766855,6415976.21623413 -110.292482513525,
66.6115104652611,6405853.07569593 -110.592071302382,63.1950039125153,6395728.92230004</coordinates>
      </LineString>
    </Placemark>
  </Document>
</kml>

```

Figura 2.16: Fitxer KML d'un satèl·lit durant 10 minuts



## CAPÍTOL 3. RESULTATS

En aquest capítol es detallen els resultats de l'estudi, així com la validació i la utilitat dels mateixos. La validació dels resultats proporcionats per cada mòdul ja han estat validats en els apartats corresponents a cada un d'ells.

### 3.1. Obtenció dels resultats

Per aprofitar la disponibilitat de dades i arribar a una relació entre temps de càlcul i validesa dels resultats, les simulacions que s'han dut a terme amb la informació dels 6 satèl·lits OneWeb disponibles durant aquest estudi (veure taula 3.1). Es descarta així utilitzar les dades de satèl·lits Starlink degut a la elevada quantitat de satèl·lits ja en òrbita (el temps de càlcul es multiplica per a cada satèl·lit a simular). Tot i això el programa és completament compatible amb treballar amb grans quantitats de satèl·lits. El fitxer TLE introduït al programa es pot consultar a l'annex A.2..

Taula 3.1: Satèl·lits a estudi per a la obtenció de resultats

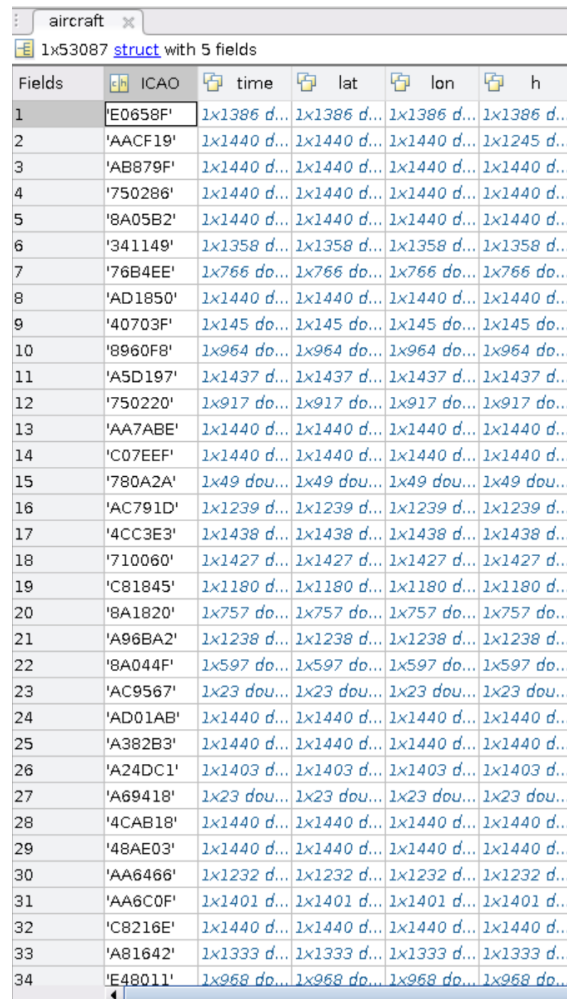
Identificador
Oneweb-0012
Oneweb-0010
Oneweb-0008
Oneweb-0007
Oneweb-0006
Oneweb-0011

Pel que fa a les dades de demanda per part d'usuaris, ja s'ha detallat l'origen i els motius pels quals s'ha optat per utilitzar dades d'avions. Els arxius utilitzats pels càlculs pertanyen al dia 1 d'agost del 2016. Tot i la disponibilitat de fitxers amb dades de trànsit aeri més recents, el motiu per escollir aquest fitxer és que conté un nombre mitjà de registres. El proveïdor d'informació ha anat instal·lant més antenes receptores d'informació (veure secció 1.4.1.) amb el temps, fet que provoca que els fitxers més actuals continguin tants registres que els càlculs amb ells puguin arribar a durar diversos mesos.

Degut a la gran quantitat de dades processades ha estat impossible reunir en una taula la informació introduïda pel càlcul. A mode d'exemple, es pot consultar la figura 3.1, que mostra una captura de pantalla on s'hi poden veure els primers elements de dades. La taula sencera té unes dimensions conté 53.000 elements, dins dels quals hi ha vectors de 1.440 elements. En total, la quantitat d'espai que ocupa és extremadament tant elevada que l'ordinador fins ara utilitzat no pot continuar amb els càlculs. Per això s'ha necessitat l'ús del servidor del CTTC (vegeu la secció 3.1.1.) aquesta quantitat de dades.

Els càlculs finals són, un cop executats tots els mòduls, els que mostren la figura 3.2. En ella, es veu la primera meitat de dades de la sèrie temporal introduïda a les xarxes LSTM i com, després de l'aprenentatge, ha sigut capaç de predir la segona meitat de les dades.

Com es pot veure, la predicció és força encertada, a falta de més dades. Les xarxes neu-



Fields	ICAO	time	lat	lon	h
1	'E0658F'	1x1386 d...	1x1386 d...	1x1386 d...	1x1386 d...
2	'AACF19'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1245 d...
3	'AB879F'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
4	'750286'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
5	'8A05B2'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
6	'341149'	1x1358 d...	1x1358 d...	1x1358 d...	1x1358 d...
7	'76B4EE'	1x766 do...	1x766 do...	1x766 do...	1x766 do...
8	'AD1850'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
9	'40703F'	1x145 do...	1x145 do...	1x145 do...	1x145 do...
10	'8960F8'	1x964 do...	1x964 do...	1x964 do...	1x964 do...
11	'A5D197'	1x1437 d...	1x1437 d...	1x1437 d...	1x1437 d...
12	'750220'	1x917 do...	1x917 do...	1x917 do...	1x917 do...
13	'AA7ABE'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
14	'C07EEF'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
15	'780A2A'	1x49 dou...	1x49 dou...	1x49 dou...	1x49 dou...
16	'AC791D'	1x1239 d...	1x1239 d...	1x1239 d...	1x1239 d...
17	'4CC3E3'	1x1438 d...	1x1438 d...	1x1438 d...	1x1438 d...
18	'710060'	1x1427 d...	1x1427 d...	1x1427 d...	1x1427 d...
19	'C81845'	1x1180 d...	1x1180 d...	1x1180 d...	1x1180 d...
20	'8A1820'	1x757 do...	1x757 do...	1x757 do...	1x757 do...
21	'A96BA2'	1x1238 d...	1x1238 d...	1x1238 d...	1x1238 d...
22	'8A044F'	1x597 do...	1x597 do...	1x597 do...	1x597 do...
23	'AC9567'	1x23 dou...	1x23 dou...	1x23 dou...	1x23 dou...
24	'AD01AB'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
25	'A382B3'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
26	'A24DC1'	1x1403 d...	1x1403 d...	1x1403 d...	1x1403 d...
27	'A69418'	1x23 dou...	1x23 dou...	1x23 dou...	1x23 dou...
28	'4CAB18'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
29	'48AE03'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
30	'AA6466'	1x1232 d...	1x1232 d...	1x1232 d...	1x1232 d...
31	'AA6C0F'	1x1401 d...	1x1401 d...	1x1401 d...	1x1401 d...
32	'C8216E'	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...	1x1440 d...
33	'A81642'	1x1333 d...	1x1333 d...	1x1333 d...	1x1333 d...
34	'E48011'	1x968 do...	1x968 do...	1x968 do...	1x968 do...

Figura 3.1: Mostra del processat de la informació que conté la demanda d'usuaris

ronals reben un millor aprenentatge com més variada és la seva informació d'entrada. En aquest sentit, podria ser útil introduir dades de diferents èpoques de l'any per a entrenar a la perfecció la xarxa neuronal. El resultat pròpiament dit però, és la pròpia xarxa entrenada, que és interna del mòdul (no és possible mostrar els seus paràmetres) que permetrà fer les previsions en un futur.

### 3.1.1. Equipament adicional per a la obtenció de resultats

Tot i que com s'ha explicat a la secció 2.1., el disseny i programació s'ha pogut realitzar amb un ordinador amb especificacions comunes, el processat dels fitxers amb dades d'avions requeria de tanta potència de càlcul que ha estat imprescindible l'ús d'un servidor de càlcul, proporcionat pel CTTC. A la taula 3.2 es poden consultar les especificacions d'aquest servidor. Tot i la gran capacitat d'aquest, el processat de dades ha estat executant-se prop de 10 dies.

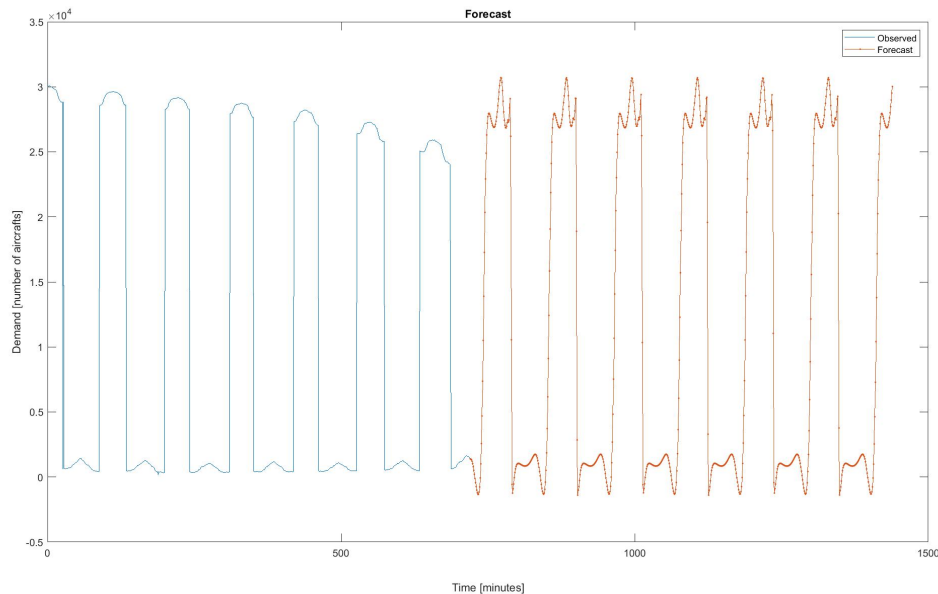


Figura 3.2: Sèrie de dades entrada i prevista pel deep learning

Taula 3.2: Especificacions del servidor de càlcul

Quantitat de memòria RAM	>120 GB
Sistema Operatiu	Linux
Versió Matlab	R2019b

## 3.2. Validació dels resultats

Degut a la impossibilitat de contrastar els resultats proporcionats pel programa per falta de precedents o programes similars, la validesa dels resultats rau en la validació dels resultats parcials de cada mòdul. És a dir, cada mòdul ha estat pensat i programat per a una funció concreta, cada funció ha estat comprovada per separat i, per tant, tot fa pensar que el funcionament global hauria de ser correcte.

## 3.3. Utilitat dels resultats

Tot i que cada mòdul del programa (descrits al capítol 2) proporciona els seus propis resultats i que es poden utilitzar individualment, quan s'executen de forma conjunta és quan es pot arribar a la utilitat per la qual van estar dissenyats.

El que s'ha aconseguit és un programa que, utilitzant tècniques d'intel·ligència artificial, és capaç de preveure la demanda que podrien tenir els satèl·lits LEO destinats establir una xarxa d'internet global un cop entrin en funcionament.

Si bé la previsió de demanda duta a terme durant aquest estudi només ha processat dades d'un sol dia per raons de cost temporal en els càlculs, cal tenir en compte que els resultats són extrapolables a períodes de temps més llargs. Augmentant la granularitat

de les dades introduïdes i mostrejar la demanda cada hora (i no cada minut com planteja l'estudi) durant mesos, permetria obtenir resultats més útils per a les autoritats.

Concretar una àrea d'estudi, com podria ser el continent europeu, també reduiria el temps que el programa està calculant el convertiria en més funcional. Aquest pot ser el cas, per exemple, si s'utilitza el programa per a proporcionar informació a la ESA.

# CONCLUSIONS

Durant el desenvolupament d'aquest treball, s'han pogut anar obtenint diverses conclusions. Algunes d'elles estan lligades directament amb el procés de disseny i posada en funcionament d'una eina informàtica des de zero, la presa de decisions en aquest camp i les dificultats que comporta aquesta tasca.

Altres conclusions es centren més en el camp pròpiament aeroespacial, on les empreses i autoritats semblen guardar un hermetisme dels seus descobriments, tecnologies i, fins i tot, amb les regulacions.

Clarament, la conclusió més important del treball és el compliment de l'objectiu principal que s'ha establert a la introducció d'aquest document: el disseny i posada en funcionament d'un software que sigui capaç de preveure la demanda d'usuaris que poden tenir els satèl·lits LEO mitjançant tècniques de deep learning. A més a més, el fet que l'eina s'hagi concebut de forma modular compleix també requeriments que hauria de complir tota eina informàtica. El software desenvolupat és consistent, redundant i adaptable fàcilment a l'entrada de diversos tipus d'informació, fet que el converteix en versàtil en molts camps d'investigació. Permet doncs, fer ús dels seus components de forma individual per exemple per visualitzar òrbites en 3 dimensions, poder fer un seguiment de dades de posició d'usuaris o predir sèries temporals gràcies a l'ús de la intel·ligència artificial.

Si bé l'eina no permet treure conclusions per si sola (no almenys amb les dades disponibles en aquest moment) deixant de banda que sí que compleix la seva funció amb èxit, la intenció sempre ha estat que es pugui utilitzar per a fer estudis reals de la demanda de connexió als microsatèl·lits en zones com Europa. El que es vol donar a entendre és que amb aquest treball no es proporciona una eina que soluciona per si sola el problema de les constel·lacions LEO, però és la base per a futurs treballs i estudis per ajudar a mitigar els efectes negatius d'aquesta nova fita tecnològica.

Per últim, el treball també ha comportat una última sèrie de conclusions. Aquestes són més personals, però no per això menys importants: degut a que el desenvolupament de l'eina s'ha realitzat al Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, l'autor ha pogut experimentar de primera mà el funcionament d'un centre d'aquestes característiques, la constància necessària i també el fet d'haver d'adaptar els objectius proposats en base als criteris considerats més importants en el camp de la investigació per a enfocar propers estudis. La conclusió més personal, però, és la satisfacció de començar un projecte des de l'inici, veure com dia darrere dia va creixent i madurant fins al final quan, lluny de quedar en un calaix, s'espera que sigui la base per a futurs projectes en aquesta direcció.



# BIBLIOGRAFIA

- [1] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESCO. p37 <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf> xi, 3, 9
- [2] Silica, Avnet 4, 7  
Low-Earth-Orbit Satellites and IoT: The Next Space Revolution  
<https://www.avnet.com/wps/portal/silica/resources/article/low-earth-orbit-satellites-and-iot/>
- [3] Wekerle, Timo, Pessoa Filho, José Bezerra, Costa, Luís Eduardo Vergueiro Loures da, Trabasso, Luís Gonzaga. (2017). Status and Trends of Smallsats and Their Launch Vehicles — An Up-to-date Review. Journal of Aerospace Technology and Management, 9(3), 269-286. <https://dx.doi.org/10.5028/jatm.v9i3.853> xi, 4, 8, 9, 10
- [4] Li, Bofeng Ge, Haibo Ge, Maorong Nie, Liangwei Shen, Yunzhong Schuh, H.. (2018). LEO enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for real-time precise positioning services. Advances in Space Research. [https://www.researchgate.net/publication/327062553\\_LEO\\_enhanced\\_Global\\_Navigation\\_Satellite\\_System\\_LeGNSS\\_for\\_real-time\\_precise\\_positioning\\_services](https://www.researchgate.net/publication/327062553_LEO_enhanced_Global_Navigation_Satellite_System_LeGNSS_for_real-time_precise_positioning_services) xi, 7
- [5] Pàgina Web oficial de Starlink, 2019 <https://www.starlink.com/> xi, 8, 9
- [6] Emiliano Re, ESA SatNEx Summer School 2018 16/05/2018 p1-p24 xi, 9, 10, 25
- [7] Dr. T.S. Kelso Celestrak satellite Tracker. [celestrak.com](http://celestrak.com) 9, 10, 16, 17, 21
- [8] Web oficial de l'Agència Espacial Europea (ESA) 10
- [9] ZHICHENG QU, GENGXIN ZHANG, HAOTONG CAO, AND JIDONG XIE LEO Satellite Constellation for Internet of Things (August the 4th 2017) 7
- [10] Vessel Finder, Historical AIS Data Service <https://www.vesselfinder.com/historical-ais-data#vessel-movements-report> 11
- [11] ADSBExchange, Historical Data, Sample Data <https://www.adsbexchange.com/data/> 11
- [12] Liang, James. An Introduction to Deep Learning. Towards Data Science, Oct 20, 2018. <https://towardsdatascience.com/an-introduction-to-deep-learning-af63448c122c> xi, 12
- [13] M. Tim Jones. Arquitecturas de aprendizaje profundo. IBM, Developer Works, 04-10-2017 <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/cc-machine-learning-deep-learning-architectures/index.html> 12, 13

- [14] Susan Li. An End-to-End Project on Time Series Analysis and Forecasting with Python. Towards Data Science, Jul9, 2018 <https://towardsdatascience.com/an-end-to-end-project-on-time-series-analysis-and-forecasting-with-python-4835e12>
- [15] MathWorks, Time Series Forecasting Using Deep Learning. Matlab Documentation, <https://se.mathworks.com/help/deeplearning/examples/time-series-forecasting-using-deep-learning.html>
- [16] Definition of Two-line Element Set Coordinate System, NASA webpage, 09/23/2011 [https://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSapplications/Post/JavaSSOP/SSOP\\_Help/tle\\_def.html](https://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSapplications/Post/JavaSSOP/SSOP_Help/tle_def.html)
- [17] Calculation of Satellite Position from Ephemeris Data ASCELIBRARY <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784411506.ap03>
- [18] Clynch, James R. Earth Coordinates February 2006 [https://web.archive.org/web/20150418092513/http://www.sage.unsw.edu.au/snap/gps/clynch\\_pdfs/coorddef.pdf](https://web.archive.org/web/20150418092513/http://www.sage.unsw.edu.au/snap/gps/clynch_pdfs/coorddef.pdf)



# APÈNDIXS



# APÈNDIX A. FITXERS TLE UTILITZATS

## A.1. ISS

ISS (ZARYA)

1 25544U 98067A 20022.41268163 .00000511 00000-0 17175-4 0 9999

2 25544 51.6457 354.6878 0004879 155.6332 307.2838 15.49579325209264

## A.2. OneWeb

ONEWEB-0012

1 44057U 19010A 19212.89475300 .00000192 00000-0 47905-3 0 9992

2 44057 87.8963 38.4875 0001452 85.9276 274.2020 13.15295126 20506

ONEWEB-0010

1 44058U 19010B 19212.89637465 .00000186 00000-0 46223-3 0 9990

2 44058 87.9017 38.4786 0001500 84.3813 275.7488 13.15294581 20556

ONEWEB-0008

1 44059U 19010C 19212.89310056 .00000188 00000-0 46772-3 0 9996

2 44059 87.8965 38.4881 0001452 82.8948 277.2348 13.15301107 20647

ONEWEB-0007

1 44060U 19010D 19212.89796708 .00000152 00000-0 36919-3 0 9993

2 44060 87.8975 38.4861 0001715 90.3171 269.8156 13.15471594 20677

ONEWEB-0006

1 44061U 19010E 19212.89960193 .00000164 00000-0 40063-3 0 9993

2 44061 87.8766 38.5072 0001493 86.4070 273.7231 13.15479918 20719

ONEWEB-0011

1 44062U 19010F 19212.59747116 .00000116 00000-0 27345-3 0 9994

2 44062 87.8860 38.5584 0001437 82.3470 277.7823 13.15480502 20677